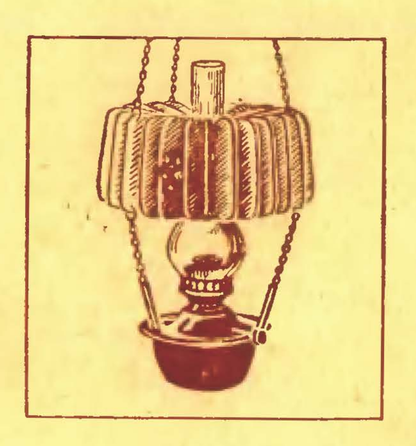
МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

А. С. БЕРНШТЕЙН

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1956

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 252

А. С. БЕРНШТЕЙН

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД

СОДЕРЖАНИЕ

В брошюре приводятся основные сведения о термоэлектрическом эффекте и его использовании для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую. Описываются различные типы термоэлектрических генераторов и современные материалы термопар, используемых в них. Даются основы расчета термоэлектрического генератора с иллюстрирующими примерами.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Автор *Бернштейн Аркадий Сергеевич*

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Редактор *П. О. Чечик* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

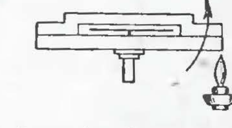
Сдано в набор 14/IV 1956 г. Подписано к печати 3/VII 1956 г.
Бумага 84×108 1/32 2,46 п. л. Уч.-изд. л. 3
Т-06863 Тираж 50 000 Цена 1 р. 20 к. Зак. № 1213

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую без применения современных генераторов, подвижные части которых сравнительно сложны в изготовлении и снашиваются в работе, имело бы значительные преимущества.

Еще в 1822 г. Зеебек обнаружил, что если нагревать один спай замкнутой цепи, составленной из двух различных металлов, то это вызовет отклонение расположенной поблизости магнитной стрелки (фиг. 1). Явление это, названное впоследствии **термоэлектрическим эффектом**, выдвигали сначала в качестве доказательства возможности непосредственного перехода тепловой энергии в магнитную и в подтверждение предположения, будто поле земного магнетизма вызывается действием вулканов. Однако вскоре было доказано, что в цепи фиг. 1, называемой **термопарой**, при нагревании одного из ее спаев протекает слабый электрический ток, магнитное поле которого и отклоняет стрелку.



Фиг. 1. Отклонение магнитной стрелки, расположенной вблизи от термопары, один из спаев которой нагрет.

Уже в 1831 г. при опытах по изучению электролиза в качестве источника тока была применена установка, в которой э. д. с. получалась за счет нагрева спаев термопар из платиновых и железных проводников. В течение второй половины прошлого века был сконструирован целый ряд термоэлектрических генераторов, основанных на том же явлении, но с использованием других материалов.

Термоэлектрические генераторы применялись в качестве источников питания при лабораторных исследованиях, однако делались попытки применять их также и для других целей. Так, например, в «Почтово-Телеграфном Журнале» за 1899 г. была помещена заметка, в которой говорилось об

использовании для питания двух маломощных 16-свечных электрических лампочек, термоэлектрического генератора, представлявшего собой печь с двойными стенками, в пространстве между которыми размещалось большое число термопар из никеля и сплава сурьмы с цинком. Наиболее известным термоэлектрическим генератором того периода является работавшая на газе батарея Гюльхера, выпускавшаяся промышленностью и использовавшаяся для зарядки аккумуляторов (см. фиг. 12 на стр. 37).

Вследствие очень низкого к. п. д. всех существовавших тогда конструкций термоэлектрических генераторов (десятые доли процента) интерес к ним ослабел, как только были изобретены имевшие значительно более высокий к. п. д. электродинамические генераторы, которые и используются с начала века до настоящего времени в установках для получения электрической энергии из тепловой. Коэффициент полезного действия современных крупных электростанций достигает 20—30%, а у самых неэффективных маломощных установок составляет примерно 5%. Насколько экономичнее такие установки термоэлектрических генераторов, видно из того, что по расчету, произведенному в 1922 г., стоимость электроэнергии в городах Европы была в 37 раз ниже стоимости количества газа, которое необходимо было сжечь для получения такого же количества электроэнергии при помощи термоэлектрического генератора, имевшего к. п. д. 0,5%.

Делались попытки применения термоэлектрических генераторов для использования бесполезно теряющегося тепла отходящих газов в различных промышленных установках, однако они не дали существенных результатов. Считалось, что термоэлектрические генераторы целесообразно применять лишь в качестве маломощных источников питания при некоторых лабораторных исследованиях. Особенно привлекала внимание идея использовать термопары для превращения энергии солнечных лучей в электрическую. В 1910 г. было даже организовано для этой цели акционерное общество, но никаких технических данных о соответствующей установке опубликовано так и не было. Насколько малоэффективными оказывались тогда термоэлектрические генераторы, использовавшие солнечную энергию, видно из экспериментальных данных, опубликованных в 1922 г.: генератор, составленный из 105 медно-константановых термопар, за счет поглощения солнечных лучей, падавших на площадь 105 *см*^{2}, давал в полдень солнечного дня не более 0,00061 *вт*, причем его к. п. д. составлял около 0,008%. Понятно, что практического значения такие генераторы иметь не могли.

С развитием радиотехники интерес к термоэлектрическим генераторам возрос. Их стремились использовать в качестве источников питания для радиоприемников в неэлектрифицированных местностях. В 1928 г. в статье, помещенной в газете «Беднота», П. О. Чечик сообщал о работе собранного им термоэлектрического генератора на железо-никелиновых термопарах, источником тепла для которого служила керосиновая осветительная лампа. В 1937 г. А. Г. Ивахненко в статье, помещенной в журнале «Радиофронт», № 13, рекомендовал сходного типа конструкцию в качестве радиолюбительского термоэлектрического генератора для питания цепей накала радиоприемника.

Новые сплавы, разработанные в последующее время и оказавшиеся более удобными для использования в качестве материалов для термоэлектрических генераторов, позволили создать образцы генераторов, работавших на жидком топливе. Вес этих генераторов составлял около 1 *кг* на ватт полезной мощности при к. п. д. порядка десятых долей процента. Во время второй мировой войны такие термоэлектрические генераторы использовались в качестве переносного, бесшумного и надежного источника питания военных радиоустановок.

В литературе сообщалось также о создании генераторов, отдававших до 300 *вт* при напряжении 12 *в* и об установке, дававшей до 90 *в*, однако при к. п. д. порядка 0,2%.

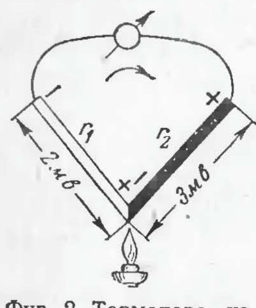
В последнее время снова возник вопрос о возможности непосредственно преобразовывать тепловую энергию в электрическую в промышленных масштабах, так как успехи физики позволили перейти к теоретически обоснованной разработке новых, более эффективных материалов для термоэлектрических генераторов. Такими материалами являются некоторые сплавы и полупроводники, применение которых дало возможность получить опытные образцы термопар с к. п. д. до 5—7%. На основе применения таких новых термопар наша промышленность выпускает теперь термоэлектрические генераторы типа ТГК-3, предназначенные для питания ряда батарейных приемников за счет тепла, отдаваемого 20-линейной керосиновой осветительной лампой.

В связи с появлением новых высокоэффективных термопар снова возник интерес к возможности прямого превращения с их помощью солнечной энергии в электрическую. Экспериментальный генератор, созданный в последние го-

ды, давал за счет поглощения солнечных лучей, падавших на площадь 360 $см^2$, до 0,175 *вт* полезной мощности, причем его к. п. д. составлял 0,59%.

1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Термоэлектрический эффект объясняется следующим образом: при нагревании одного конца стержня из металла или полупроводника, между его горячим и холодным концами возникает разность потенциалов, величина которой и знак могут быть различны. Очевидно, что, соединив два проводника, изготовленных из разных материалов, в замкнутую цепь и нагревая точку соединения проводников, образующих термопару (фиг. 2), получим в цепи э. д. с. (термо-э. д. с.), определяемую разностями потенциалов, возникающих в используемых проводниках при их неравномерном нагреве.



Фиг. 2. Термопара из двух проводников.

Если, как показано на фиг. 2, разность потенциалов между горячим и холодным концами проводника r_1 составляет 2 *мв*, а проводника r_2=—3 *мв*, то термо-э. д. с. в цепи термопары будет e_t=2—(—3) = 5 *мв*. Ток, вызываемый ею, будет протекать в направлении, указанном стрелкой. В случае же, если разность потенциалов для проводника r_1 составляет 1 *мв*, а для проводника r_2 4 *мв*, термо-э. д. с. будет e_t= 1 — 4 = —3 *мв* и ток, вызванный ею, будет протекать в обратном направлении.

Включение в цепь термопары каких-либо проводников, например проводов, которыми присоединен гальванометр, не будет оказывать влияния на термо-э. д. с., если точки их присоединения имеют одинаковую температуру; предполагается, что оба соединительных провода сделаны из одного и того же материала.

Термо-э. д. с., возникающая в термопаре, зависит не только от разности температур горячего и холодного спаев термопары, но обычно и от абсолютного значения этих температур. Данные, полученные на основании многочисленных измерений термо-э. д. с., различных термопар, удобно представить в виде таблицы, в которой приводятся значения термо-э. д. с., развиваемой различными материалами в комбинации с каким-нибудь одним и тем же материалом (табл. 1).

Таблица 1

Термо-э. д. с. различных термопар

$t_г$, °C	Термо-э. д. с. при t_x = 0° С, *мв*					
	Платина-хромель	Платина-алюмель	Платина-медь	Платина-железо	Платина-константан	Платина-манганин
0	0	0	0	0	0	0
100	+2,81	—1,29	+0,76	+1,89	—3,51	+0,61
200	+5,96	—2,17	+1,83	+3,54	—7,45	+1,55
300	+9,32	—2,89	+3,15	+4,85	—11,71	+2,77
400	+12,75	—3,64	+4,68	+5,88	—16,19	+4,25
500	+16,21	—4,43	+6,41	+6,79	—20,79	+5,95
600	+19,62	—5,28	+8,34	+7,80	—25,47	+7,84
700	+22,96	—6,18	+10,49	+9,12	—30,18	—
800	+26,23	—7,08	+12,84	+10,86	—34,86	—
900	+29,41	—7,95	+15,41	+12,84	—39,45	—
1 000	+32,52	—8,79	+18,20	+14,30	—43,92	—

В качестве такого общего для всех термопар данной таблицы материала, называемого нормальным электродом, принято брать химически чистую платину. В табл. 1, составленной именно таким образом, приведены значения термо-э. д. с. некоторых металлов и сплавов, применяемых в электротехнике, в комбинации с чистой платиной при температуре холодного спая t_x, равной нулю, и различных температурах горячего спая $t_г$.

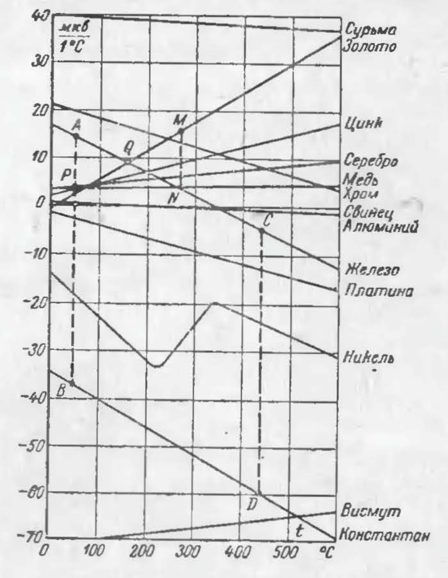
Чтобы определить термо-э. д. с. термопары, составленной из каких-нибудь двух приведенных в табл. 1 материалов, при некоторой заданной температуре их горячего спая и температуре холодного спая, равной нулю, следует взять разность термо- э. д. с., указанных в таблице для этих материалов, развиваемых ими при заданной температуре горячего спая в комбинации с нормальным электродом.

Так, например, можно найти, что при температуре горячего спая $t_г$= 300° С и холодного t_x = 0° С термопара медь — манганин даст 3,15—2,77 = 0,38 *мв*, а термопара манганин — константан при тех же температурах даст 2,77 — (—11,71) = 14,48 *мв*.

Если требуется определить, какую термо-э. д. с. даст термопара, холодный конец которой имеет температуру, отличную от нуля, то следует найти, какие термо-э. д. с. она даст при температуре холодного спая, равной нулю, и температурах горячего спая, равных действительным температурам ее горячего и холодного спаев, и взять разность меж-

ду полученными значениями. Так, например, термопара манганин — константан при температуре горячего спая 300° С и холодного 100° С даст 14,48 — [0,61 — (—3,51)] = = 10,36 *мв*.

Другим, более наглядным способом изображения тех же данных о термо-э. д. с., развиваемых различными термопарами, является построение так называемых кривых «термоэлектрической способности» различных материалов.



Фиг. 3. Кривые термоэлектрической способности различных материалов.

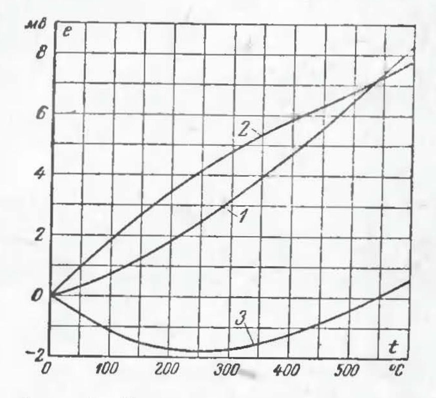
На фиг. 3 приведены такие кривые, построенные для ряда материалов на основании данных, приводимых многими авторами. Кривые эти, практически представляющие собой наклонные прямые, строятся так, что термо-э. д. с., развиваемая термопарой, составленной из каких-нибудь двух материалов, определяется, как площадь, заключенная между отрезками кривых термоэлектрической способности этих материалов и перпендикулярами, восстановленными к оси температур в точках, соответствующих температурам горячего и холодного спаев термопары.

Пользуясь графиком фиг. 3, можно, например, найти, что термо-э. д. с. термопары железо—константан при

температуре нагретого спая $t_г = 450°$ С и холодного $t_х = 50°$ С равна площади *ABCD*:

$$e_{50}^{450} = \text{пл. } ABCD = \frac{AB + CD}{2}(450—50) = 55 \cdot 400 = 22\,000 \text{ мкв, или } 22 \text{ мв}.$$

Кривые термоэлектрической способности некоторых материалов пересекаются между собой. Если они пересекаются (фиг. 3) при температуре, лежащей между температурами горячего и холодного спаев термопары, составленной из данных материалов, то термо-э. д. с., развиваемая термопарой, будет равна разности площадей, заключенных между этими кривыми до точки их пересечения и после нее. Например, э. д. с. термопары золото—железо при температурах 275 и 50° С равна разности площадей *APQ* и *MNQ*, так что при увеличении температуры горячего спая выше 160° С термо-э. д. с. этой термопары будет уменьшаться. Такое явление наблюдается у целого ряда термопар.

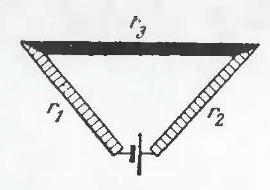


Фиг. 4. Кривые изменения термо-э. д. с. в зависимости от температуры горячего спая при температуре холодного спая 0° С для различных термопар.

1 — платина—медь; *2* — платина — железо; *3* — медь—железо.

На фиг. 4 представлены кривые изменения термо-э. д. с. трех термопар в зависимости от изменения температуры их горячего спая при температуре холодного спая, равной 0° С. Из графика видно, что у термопары медь — железо э. д. с. при температуре 540° С меняет знак. Это явление называется и н в е р с и е й.

С термоэлектрическим эффектом тесно связан по своей природе эффект Пельтье. Протекание электрического тока сопровождается переносом тепла. Если пропускать постоянный ток от внешнего источника через термопару (не нагревая ее специально), то тепло будет переноситься от одного из ее спаев к другому. Ток от внешнего источника, протекающий через спаи в том же направлении, что и ток возникающий, если этот спай нагревать, вызывает охлаждение спая; ток от внешнего источника, пропущенный через тот же



Фиг. 5. Схема опыта для обнаружения эффекта Пельтье.

спай в противоположном направлении, вызовет его дополнительный нагрев. При работе термопары протекающий по ней ток также переносит тепло от ее нагретого спая к холодному.

Опыт, позволяющий обнаружить эффект Пельтье, состоит в том, что при пропускании тока от внешнего источника через цепь, составленную, как это показано на фиг. 5, из двух одинаковых проводников r_1 и r_2 и третьего проводника r_3 из другого материала, температуры спаев r_1r_3 и r_3r_2 оказываются неодинаковыми.

2. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕРМОПАРЫ

Для оценки возможностей, представляемых термоэлектрическим генератором, прежде всего интересно выяснить, какой к. п. д. могут иметь различные термопары в качестве преобразователя тепловой энергии в электрическую.

Обозначим через $t_г$ температуру горячего и через t_x холодного спаев термопары, выраженные в градусах абсолютной шкалы, а через e — среднее значение приращения термо-э. д. с., развиваемой термопарой при повышении температуры ее горячего спая на 1° С в интервале от t_x до $t_г$, выраженное в вольтах на градус; через ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления материалов, из которых составлены термопары, выраженные в *ом·мм²/м*; через $\varkappa_1$ и $\varkappa_2$ — удельные теплопроводности материалов термопары, выраженные в *вт м/мм²*; через s_1 и s_2 — площади сечения проводников термопары, выраженные в *мм²*; через l — длину проводника термопары, принимаемую одинаковой для обоих проводников и выраженную в *м*; через R — сопротивление нагрузки в *ом*. Тогда сопротивление термопары

$$r = \frac{\rho_1 l}{s_1} + \frac{\rho_2 l}{s_2}, \qquad (1)$$

а теплопроводность

$$\varkappa = \frac{\varkappa_1 s_1}{l} + \frac{\varkappa_2 s_2}{l}, \qquad (2)$$

причем, так как удельное сопротивление и теплопроводность материалов зависят от температуры, которая при работе термопары сильно изменяется по длине послед-

ней, то в формулах (1) и (2) следует вставлять значения ρ_1, ρ_2, $\varkappa_1$ и $\varkappa_2$, соответствующие средней температуре проводников термопары, вычисленной по формуле

$$t = t_x + \frac{t_г - t_x}{2} = \frac{t_г + t_x}{2}. \qquad (3)$$

Термо-э. д. с., развиваемая термопарой:

$$e_t = e(t_г - t_x), \qquad (4)$$

ток, протекающий в цепи термопары:

$$I = \frac{e_t}{r + R}$$

и мощность, отдаваемая при этом термопарой в нагрузку, включенную вместо гальванометра на фиг. 2;

$$P = I^2 R = \frac{e_t^2 R}{(r + R)^2}. \qquad (5)$$

При одном и том же значении э. д. с. e_t наибольшая мощность в нагрузке выделяется, если сопротивление нагрузки R равно сопротивлению термопары r. Мощность эта будет равна:

$$P_0 = \frac{e_t^2}{4r}. \qquad (6)$$

При этом в цепи термопары будет расходоваться вдвое бо́льшая мощность, половина которой будет затрачиваться на нагревание термопары:

$$2P_0 = \frac{e_t^2}{2r}.$$

Согласно законам термодинамики процесс преобразования тепла в электрическую энергию, связанный с его переносом от горячего спая, имеющего температуру $t_г$, к холодному спаю, имеющему температуру t_x, имеет к. п. д., равный $\frac{T_г - T_x}{T_г}$, где температуры T выражены в градусах абсолютной шкалы и равны соответствующим температурам в градусах Цельсия $t°\,C + 273°$. Следовательно, для получения электрической мощности $2P_0$ в цепи термопары в последнюю через горячий спай

в единицу времени должно поступать количество тепловой энергии, равное:

$$P_т = \frac{T_г}{T_г - T_x} \cdot 2P_0. \qquad (7)$$

Кроме того, так как проводники термопары обладают теплопроводностью, через нее неизбежно протекает значительное количество тепловой энергии, не участвующей в процессе преобразования тепловой энергии в электрическую, что очевидно, так как это тепло протекает и через разомкнутую термопару, в которой никакого расхода электрической мощности не происходит. Количество протекающей таким образом энергии определяется по формуле

$$P_ϰ = ϰ(t_г - t_x). \qquad (8)$$

Коэффициент полезного действия термопары равен отношению полезной электрической мощности, выделяющейся в ее нагрузке, к количеству тепловой энергии, поступающей в термопару в единицу времени через ее горячий спай:

$$\eta = \frac{P_0}{P_т + P_ϰ}. \qquad (9)$$

Из формул (6), (8) и (9) видно, что к. п. д. термопары тем меньше, чем больше ее теплопроводность, а следовательно, $P_ϰ$, и чем больше ее сопротивление, т. е. чем меньше P_0.

Существует некоторое наивыгоднейшее соотношение между сечениями проводников термопары. Оно определяется формулой

$$s_\eta = \frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{\rho_1 ϰ_2}{\rho_2 ϰ_1}}. \qquad (10)$$

Таким образом, если заданы температуры горячего и холодного спаев термопары $t_г$ и t_x и выбраны материалы ее проводников, то максимальный к. п. д. она даст при соблюдении двух условий: равенстве сопротивления нагрузки R сопротивлению термопары r и наивыгоднейшем соотношении сечений проводов термопары s_η, выбранном по формуле (10). Подставляя в формулу (9) значения P_0, $P_т$ и $P_ϰ$ из формул (6), (7) и (8), а затем r, $ϰ$ и s_η, по формулам (1), (2) и (10) можно получить

формулу, определяющую максимально возможный при указанных выше условиях к. п. д. термопары в виде:

$$\eta_{макс} = \frac{T_г - T_x}{T_г} \cdot \frac{1}{2 + \frac{4(\sqrt{\rho_1 ϰ_1} + \sqrt{\rho_2 ϰ_2})^2}{e^2 T_г}}. \qquad (11)$$

Как видно из этого выражения, $\eta_{макс}$ не зависит от длины термопары l и сечений ее проводников s_1 и s_2, которые только связаны между собой отношением (10).

Считать, что максимальный к. п. д. термопара дает при $R = r$, можно лишь при условии, что $P_т$ много меньше, чем $P_ϰ$ (если $P_т$ близко по величине к $P_ϰ$, то максимальный к. п. д. получится при $R > r$). Однако при практически применяемых в термогенераторах температурах $t_г$ и t_x для всех известных в настоящее время термопар $P_т$ оказывается во много раз меньше $P_ϰ$ и потому для них вполне пригодна формула (11). Насколько точные результаты получаются по этой формуле, видно из того, что вычисленное по ней значение $\eta_{макс}$ для термопары хромель—константан при температурах $t_x = 20°$ С и $t_г = 320°$ С равняется 0,64% и при $t_x = 20°$ С и $t_г = 530°$ С равняется 0,96%, а полученные опытным путем значения были соответственно 0,58 и 0,92%.

Формула (11) показывает, как зависит максимальный к. п д. термопары от ее e_t и значений ρ и $ϰ$ материалов, составляющих термопару, что позволяет сравнивать пригодность различных термопар для применения их в термоэлектрических генераторах, а также обоснованно выбирать материалы для составления таких термопар.

3. КРАТКИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАБОТЕ ТЕРМОПАР

Электропроводность, теплопроводность и возникающая в материале при его нагреве термо-э. д. с. тесно связаны со структурой этого материала и поэтому до некоторой степени и между собой. Изучение этих связей привело к установлению важных количественных соотношений, позволяющих теоретически определить возможности получения высокоэффективных термопар из различных материалов.

В настоящее время термо-э. д. с., электропроводность и теплопроводность твердых тел объясняются следующим

образом. В металлах валентные электроны могут свободно перемещаться наподобие молекул в газе. При нагревании одного из концов металлического стержня эти свободные электроны в нагретом конце приобретут бо́льшие скорости, чем электроны в холодном конце, и вследствие этого будут переходить к последнему в большем числе, чем в обратном направлении. Таким образом, на холодном конце стержня концентрация электронов, а следовательно, и отрицательный заряд будут повышаться, пока созданное отрицательным зарядом электрическое поле не окажется достаточно большим для того, чтобы противодействовать дальнейшему увеличению разности концентраций.

Кроме свободных электронов, в металлах имеется большое количество электронов, которые не могут так легко перемещаться. Квантовой механикой установлено, что в отдельном атоме каждого элемента электроны могут находиться лишь в некоторых определенных состояниях, характеризуемых запасом энергии электрона, или, как говорят, занимать определенные энергетические уровни, причем на одном энергетическом уровне может одновременно находиться не более двух электронов.

Таким образом, с занимаемого им уровня электрон может переходить лишь на такой уровень, на котором в данный момент находится менее двух электронов, причем для того, чтобы переход осуществился, электрон должен получить от внешнего источника (при переходе на более высокий уровень) или отдать сам (при переходе на более низкий уровень) количество энергии, равное разности энергий соответствующих уровней.

При объединении n одинаковых атомов в кристаллическую решетку вместо каждого из энергетических уровней отдельного атома образуется n уровней, очень мало отличающихся по энергии от этого уровня. Валентные электроны в металлах могут легко перемещаться благодаря тому, что в атомах металла на соответствующих энергетических уровнях имеется лишь по одному электрону и потому при объединении n таких атомов получается n свободных мест на различных уровнях, весьма близких по характеризующей их энергии. Электроны, находящиеся в атоме вещества по два на одном уровне, при объединении атомов в кристаллическую решетку не могут так легко перемещаться, так как все близкие к занимаемому ими уровни заполнены; про них говорят, что они находятся в зоне заполненных уровней.

Если в теле нет свободных электронов, т. е. в нем все

электроны находятся в зонах заполненных уровней, то такое тело является изолятором, не проводящим электрического тока. Если энергия теплового движения электрона в данном материале достаточно велика, чтобы заметное число их перешло из заполненных зон в зону свободного состояния, то такой материал называют полупроводником.

Таким образом, материал, являющийся изолятором при более низкой температуре, при повышении последней может становиться полупроводником. В природе не бывает идеально чистых кристаллов; в них всегда оказывается большее или меньшее количество примесей. Атомы этих примесей могут иметь свободные электроны или захватывать электроны из атомов, образующих решетку кристалла. Такие захваченные электроны освобождают занимавшиеся ими ранее места на энергетических уровнях, так что в заполненных зонах образуются так называемые «дырки». При нагревании одного конца стержня из полупроводника, примеси в котором захватывают электроны, дырки, как показывает опыт, ведут себя подобно электронам, как бы имеющим положительный заряд. Их концентрация у нагретого конца понижается, а у холодного увеличивается, и холодный конец оказывается заряженным положительно относительно нагретого. Перемещение дырок происходит в сущности за счет заполнения их электронами, переходящими с других энергетических уровней, на которых при этом освобождаются места, т. е. образуются новые дырки. В полупроводниках, в которых за счет примесей имеются свободные электроны, термо-э. д. с. возникает таким же образом, как и в металлах.

Электропроводность в металлах объясняется перемещением под действием электрического поля свободных электронов, а в полупроводниках может быть обусловлена перемещением как свободных электронов, так и дырок. Во втором случае ее называют д ы р о ч н о й, а в первом э л е к т р о н н о й проводимостью.

Теплопроводность связана как с передачей тепла свободными электронами, поведение которых похоже на поведение молекул газа, так и с передачей теплового движения от одного узла кристаллической решетки к другому в виде колебаний атомов и молекул, занимающих эти узлы.

Так как от концентрации свободных электронов и их движения зависят как электропроводность, так и теплопроводность (не связанная с колебаниями молекул в узлах кристаллической решетки), то эти величины связаны между

собой. Для многих металлов, теплопроводность которых практически зависит только от движения электронов, связь эта была уже давно обнаружена опытным путем и формула, ее выражающая, известна, как закон Видемана-Франца:

$$\rho\varkappa = 2{,}45 \cdot 10^{-8} T. \qquad (12)$$

Впоследствии коэффициент $2{,}45 \cdot 10^{-8}$ был вычислен также исходя из теоретических соображений. Для полупроводников этот коэффициент имеет несколько иную величину и для них связь между теплопроводностью и электропроводностью имеет вид:

$$\rho\varkappa = 1{,}5 \cdot 10^{-8} T + \varkappa_f \rho,$$

где $\varkappa_f$ — независящая от температуры величина, характеризующая теплопроводность, связанную с колебаниями узлов кристаллической решетки.

4. МАТЕРИАЛЫ ТЕРМОПАР ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

Уже в течение нескольких десятков лет термопары широко применяются в приборах для измерения температуры, тока, интенсивности солнечной радиации. В настоящее время хорошо известны свойства целого ряда термопар. Некоторые типы термопар стандартизованы и выпускаются промышленностью. Большинство из них составлено из металлов или их сплавов, являющихся проводниками (железо, медь, платина, константан и др.).

В табл. 2 приведены физические характеристики материалов термопар. Совершенно очевидно, что при конструировании термоэлектрических генераторов не могут быть использованы измерительные термопары, в состав которых входят такие дорогостоящие металлы, как платина или золото. Кроме того, необходимо выяснить, какой к. п. д. может дать та или иная термопара, что обычно не представляется существенным при использовании их в измерительных приборах.

Так как произведение удельной теплопроводности на удельное сопротивление для большинства металлов и их сплавов равняется или весьма близко к величине, определяемой формулой (12), то для них, беря значение ρ и $\varkappa$,

Таблица 2

Физические свойства материалов термопар

Материалы	Удельный вес, г/см³	Удельная теплопроводность, вт·м/мм²·°С·10⁻⁶				Удельное сопротивление, ом·мм²/м				Предельная температура °С		Температура плавления, °С
		0° С	100° С	200° С	300° С	0 °С	100° С	200° С	300° С	для длительного использования	для кратковременного использования	
Алюмель	8,5	—	—	—	—	0,35	—	—	—	1 000	1 250	1 450
Алюминий	2,7	197	209	230	270	0,032	0,044	—	—	—	—	650
Висмут	9,8	8,5	6,7	—	—	1,2	—	—	—	—	—	—
Железо	7,8	68	50	43	35	0,1	0,17	0,25	0,35	600	800	1 400
Константан	8,9	22	26	30	34	0,49	0,49	0,49	0,49	600	800	1 220
Манганин	8,4	22	26	—	—	0,31	0,31	0,31	0,32	—	—	910
Медь	8,9	391	384	379	373	0,017	0,024	0,031	0,039	350	500	1 080
Никель	8,75	59	58	57	56,7	0,12	0,2	0,3	—	1 000	1 100	1 455
Платина	21,4	69	72	—	—	0,1	0,14	0,18	0,22	—	—	—
Сурьма	6,7	18,3	16,8	—	—	0,005	—	—	—	—	—	630
Хромель	8,7	15,5	18	20	23	0,7	0,73	0,76	0,79	1 000	1 250	1 450
Цинк	6,86	112,5	106,7	103	99	0,059	0,082	—	—	—	—	419

2—436

соответствующие среднему значению температуры термопар $\frac{t_г + t_x}{2}$, формулу (11) можно представить в виде:

$$\eta_{0\,макс} = \frac{T_г - T_x}{T_г} \cdot \frac{1}{2 + \frac{19{,}6 \cdot 10^{-8}}{e^2} \cdot \frac{T_г + T_x}{T_г}}. \tag{13}$$

Как видно из последнего выражения, к. п. д. металлических термопар растет с ростом температуры $T_г$. Однако вследствие сравнительно небольших значений термо-э. д. с. (ниже 80 *мкв* на 1° С) металлических термопар их к. п. д. не превышает 1—2% при значениях температуры $T_г$, не превосходящих наибольшую температуру, при которой эти термопары могут длительно работать.

В тех случаях, когда теплопроводность металла оказывается больше, чем это следует из формулы (12), т. е. заметным образом сказывается влияние теплопроводности, обусловленной движением узлов кристаллической решетки, поток бесполезно протекающего по термопаре тепла возрастает и ее к. п. д. уменьшается. Несмотря на низкий к. п. д., термопары хромель — константан, железо — константан и медь — константан применялись в термоэлектрических генераторах. Вследствие доступности и благоприятных технологических характеристик (прочность, легкость соединения спаев) входящих в их состав материалов именно такого типа термопары могут быть применены и в настоящее время радиолюбителем, собирающим термоэлектрический генератор.

Очевидно, что для получения более высоких к. п. д. термоэлектрического генератора в нем должны применяться термопары, дающие термо-э. д. с., превосходящую 100 *мкв* на 1° С. Материалом для таких термопар могут служить прежде всего различные сплавы сурьмы, висмута, селена, теллурия и кремния. Практический интерес в настоящее время представляют сплавы цинка с сурьмой и висмута с сурьмой.

Еще в прошлом веке в термоэлектрических генераторах применяли сурьму и ее сплавы. За последнее время были разработаны сплавы сурьмы с висмутом и сурьмы с цинком, содержащие незначительные примеси других элементов и позволяющие составлять термопары, термо-э. д. с. которых превышает иногда 300 *мкв* на 1° С.

В табл. 3 приведены данные трех практически наиболее ценных сплавов такого типа. Сплав примерно из 9 весовых

462—1

частей висмута и 1 части сурьмы обозначен «висмут+сурьма», соответственно сплав из 9 весовых частей висмута и 1 части смеси сурьмы с оловом обозначен «висмут + сурьма + олово», а сплав, составленный по весу примерно из 2/3 сурьмы и 1/3 цинка с незначительными примесями олова, серебра и висмута, обозначен «сурьма + цинк».

Таблица 3

Физические свойства новых материалов термопар

Материалы	Удельный вес, *г/см³*	Удельная теплопроводность *вт·м/мм²·°С·10⁻⁶*			Удельное сопротивление, *ом·мм²/м*			Температура плавления, °С
		60° С	110° С	220° С	60° С	110° С	220° С	
Висмут+сурьма	9,5	4,1	4,4	—	2	2,2	—	270
Висмут+сурьма+олово	9,4	4,7	5,4	—	2,35	2,4	—	—
Сурьма+цинк	6,8	2,1	1,8	1,7	19	22	24	—

В табл. 4 приведены данные термопар, составленных с использованием этих сплавов. Применение их ограничено сравнительно низкими точками плавления входящих в них элементов, не позволяющими применять их при температурах горячего спая, превосходящих 250—400° С. Кроме того, они довольно хрупки (сплав висмут + сурьма легко ломается при сечении, меньшем 0,2 *см²*, а сплав сурьма + цинк,— меньшем 0,8 *см²*). Однако, как видно из табл. 5, эти новые сплавы позволяют получить даже при относительно низких температурах значительно бо́льшие к. п. д., чем измерительные термопары.

Предварительные испытания показали, что, кроме сплавов цинка, сурьмы и висмута, некоторые другие полупроводниковые материалы также могут представлять интерес с точки зрения их использования в термоэлектрических генераторах. Для полупроводников характерно понижение удельного сопротивления при возрастании температуры, однако при этом обычно понижается и термо-э. д. с., так что к. п. д. составленных из них термопар с возрастанием рабочих температур сначала увеличивается, а затем начинает понижаться. Полупроводники в чистом виде при комнатной температуре имеют удельное сопротивление, близкое к удельному сопротивлению изоляторов, но небольшие количества примесей снижают его в некоторых случаях в 10^3—10^6 раз. Коэффициент полезного действия термопары, со-

2*

ставленной из сернистого свинца и сплава цинк + сурьма при разности температур 400° С, развивающей термо-э. д. с. 300—400 *мкв* на 1° С, может быть порядка 10%. Однако даже в условиях лабораторных испытаний от нее удалось получить к. п. д. всего лишь 7%, так как не удалось в достаточной степени снизить переходное сопротивление горячего спая.

Таблица 4

Термо-э. д. с. термопар из новых материалов в зависимости от $t_г$ при $t_x = 20°$ С

Термопары	$t_г$, °С		
	100	200	420
	Термо-э. д. с. e, *мв*		
(Висмут + сурьма + олово) — (висмут + сурьма)	10,6	23,4	—
(Сурьма + цинк) — константан	16,8	40,5	96
(Сурьма + цинк) — (висмут + сурьма)	19,2	48,9	—
(Теллур + сурьма) — (висмут + сурьма) . . .	65	130	—

Таблица 5

Максимальный к. п. д. в процентах различных термопар в зависимости от $t_г$ при $t_x = 20°$ С

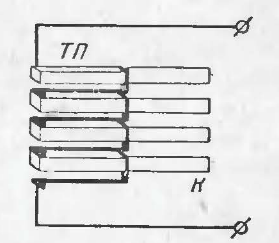
Термопары	$t_г$, °С			
	120	220	420	620
	Коэффициент полезного действия, %			
Хромель — константан	0,16	0,37	0,83	1,22
Железо — константан	0,22	0,33	0,59	0,87
Медь — константан	0,11	0,3	0,54	—
(Сурьма + цинк) — константан	1,25	2,75	5,7	—
(Сурьма + цинк) — (висмут + + сурьма)	1,55	3,65	—	—

Поиски более эффективных материалов пока еще не дали желаемых результатов. Все известные материалы термопар, развивающие 400—500 *мкв* на 1° С, пригодные для работы при температурах порядка 700—900° С, обнаруживают настолько сильное отклонение от закона Видемана-Франца, что позволяют получить к. п. д. всего лишь несколько процентов.

5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Термоэлектрический генератор состоит из блока термопар, электрически соединенных между собой, нагревателя, обеспечивающего приток тепла к их горячим спаям, и системы охлаждения их холодных спаев. Схематически устройство термоэлектрического генератора изображено на фиг. 6.

Число термопар в генераторе стремятся брать возможно меньшим. соединяя их все последовательно. Большое число соединенных параллельно-последовательно термопар нежелательно из-за увеличения числа спаев, усложняющего сборку генератора и уменьшающего надежность его работы. Однако при использовании генератора для нескольких различных видов работы иногда предусматривается переключение групп термопар параллельно друг другу.



Фиг. 6. Схематическое изображение устройства термоэлектрического генератора.

ТП — термопары; *К* — металлические крылья, прикрепленные к термопарам для увеличения площади охлаждения их холодных концов.

Термоэлектрический генератор обычно работает в двух основных режимах: на постоянную по величине активную нагрузку и в качестве источника питания при зарядке аккумуляторных батарей. Общий к. п. д. термоэлектрического генератора, понимаемый, как отношение полученной полезной мощности к количеству тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени в результате сгорания топлива, можно представить в виде:

$$\eta_{общ} = \eta \cdot \eta_t, \tag{14}$$

где η_t — коэффициент, показывающий, какая часть выделившейся при горении тепловой энергии проходит через термопары;

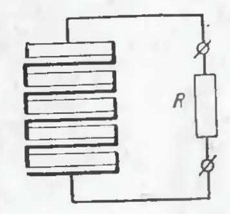
η — к. п. д. блока термопар, представляющий собой отношение полученной полезной мощности к количеству тепловой энергии, проходящей в единицу времени через термопары.

Условия, при которых η достигает своего максимального значения ($\eta_{макс}$), были рассмотрены в § 2. Если, как это имеет место в современных термоэлектрических генераторах, лишь незначительная часть тепловой энергии, протекающей через термопары, преобразуется в электри-

ческую, то η_t практически не зависит от электрической схемы соединения термопар и нагрузки, так как в основном определяется независящим от последних потоком тепла через термопары, обусловливаемым их теплопроводностью.

6. РАБОТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПОСТОЯННУЮ АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

На фиг. 7 показана схема включения термоэлектрического генератора на постоянную по величине активную нагрузку. Активной нагрузкой, для питания которой используется термоэлектрический генератор, обычно являются цепи накала ламп или первичная обмотка вибропреобразователя. При этом заданным оказывается не только сопротивление R, но и мощность P, которая должна в ней расходоваться, а следовательно напряжение U на нагрузке и ток I, протекающий через нее. Необходимое число K термопар, каждая из которых имеет внутреннее сопротивление r и развивает термо-э. д. с. e_t, нетрудно подсчитать, исходя из выражения для тока I, написанного для схемы фиг. 7:



Фиг. 7. Схема включения термоэлектрического генератора на активную нагрузку R.

$$I = \frac{Ke_t}{R + Kr}, \tag{15}$$

откуда

$$K = \frac{IR}{e_t - Ir} = \frac{U}{e_t - Ir}. \tag{16}$$

Из формулы (16) видно, что чем меньше внутреннее сопротивление термопар, тем меньшее число их требуется для получения заданной мощности, а также, что термопары, имеющие $r > \frac{e_t}{I}$, вообще не могут быть использованы в данном случае. Из того же выражения следует, что при питании цепей накала число необходимых термопар будет зависеть от выбора схемы соединения нитей накала, которая определяет значение сопротивления нагрузки R. Для радиолюбителя практически может оказаться интересным выяснить, как выгоднее соединить между собой K готовых термопар для питания определенной нагрузки, например при использовании термопар, применявшихся ранее для питания другой нагрузки.

Термоэлектрический генератор, рассчитанный для питания постоянной нагрузки по формуле (16), не будет,

вообще говоря, отдавать в эту нагрузку наибольшую полезную мощность, которую можно получить от него. Если K термопар, питающих активную нагрузку R, соединить в N параллельных групп по $M = \frac{K}{N}$ термопар, соединенных последовательно в каждой, то ток, протекающий через нагрузку, будет:

$$I = \frac{Me_t}{R + \frac{Mr}{N}} = \frac{e_t}{\frac{R}{M} + \frac{r}{N}} = \frac{e_t}{\frac{NR}{K} + \frac{r}{N}}. \tag{17}$$

Обозначим через N_0 то значение, при котором знаменатель последнего выражения будет иметь наименьшее значение, а ток через нагрузку наибольшее:

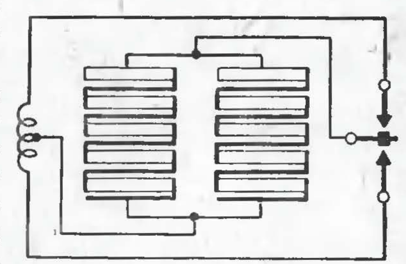
$$N_0 = \sqrt{\frac{Kr}{R}}. \tag{18}$$

Используя формулы (17) и (18), находим, что максимальная мощность, которую можно получить от K термопар, будет:

$$P_0 = I^2 R = \frac{e_t^2 R}{\left(\frac{N_0 R}{K} + \frac{r}{N_0}\right)^2} = \frac{Ke_t^2}{4r}, \tag{19}$$

откуда видно, что величина максимальной полезной мощности P_0, которую можно получить от термоэлектрического генератора, не зависит от нагрузки, если только N_0 получается равным целому числу.

На фиг. 8 показана схема включения термоэлектрического генератора, работающего на первичную обмотку вибропреобразователя. Генератор для такой нагрузки можно с достаточной точностью рассчитать по формулам для постоянной активной нагрузки. Ток в цепи первичной обмотки вибропреобразователя и напряжение, которое должно на ней падать для того, чтобы в цепи вторичной обмотки получались требуемые напряжение и ток, зависят от конструкции вибропреобразователя и указываются как его тех-


Фиг. 8. Схема включения термоэлектрического генератора при питании вибропреобразователя.

нические характеристики. Так, например, вибропреобразователь типа ВП-1 дает во вторичной цепи ток 10—12 *ма* при напряжении 110 *в*, потребляя в первичной цепи 0,33 *а* при 6 *в*. Коэффициент полезного действия вибропреобразователя обычно лежит в пределах 40—60%.

Пример 1. Сколько железо-константановых термопар длиной 5 *см* с сечением железного проводника 0,75 *мм*² и константанового 1 *мм*², работающих при температуре горячего спая 340° С и холодного спая 50° С, потребуется для питания нитей накала пяти ламп, имеющих напряжение накала 1,2 *в*, из которых три потребляют по 0,075 *а*, одна 0,05 *а* и еще одна 0,025 *а*?

По данным табл. 1 (интерполяцией) находим термо-э. д. с. железо-константановой термопары $e_t = 18{,}76 - 2{,}7 = 16{,}06$ *мв*. По формуле (3) определяем среднюю температуру термопары

$$t = \frac{340 + 50}{2} \approx 200° \text{ C}.$$

По данным табл. 2 принимаем удельное сопротивление железа при 200° С равным 0,25 *ом · мм²/м* и сопротивление константана 0,5 *ом·мм²/м*.

По формуле (1) находим сопротивление термопары

$$r = \left(\frac{0{,}25}{0{,}75} + \frac{0{,}5}{1}\right) 0{,}05 = 0{,}04 \text{ ом}.$$

Ток, потребляемый всеми лампами при их параллельном включении, составит $3 \cdot 0{,}075 + 0{,}05 + 0{,}025 = 0{,}3$ *а*.

По формуле (16) находим:

$$K = \frac{1{,}2}{0{,}016 - 0{,}3 \cdot 0{,}04} = 300.$$

При параллельном соединении двух ламп, потребляющих по 0,075 *а*, и последовательно с ними трех остальных ламп, тоже соединенных между собой параллельно, $U = 1{,}2 \cdot 2 = 2{,}4$ *в*; $I = 0{,}075 \cdot 2 + 0{,}075 + 0{,}05 + 0{,}025 = 0{,}15$ *а* и по формуле (16)

$$K = \frac{2{,}4}{0{,}016 - 0{,}15 \cdot 0{,}04} = 240.$$

И, наконец, при последовательном соединении трех ламп, потребляющих по 0,075 *а*, и параллельного соединения двух остальных ламп

$$U = 1{,}2 \cdot 4 = 4{,}8 \text{ в}, \quad I = 0{,}075 \text{ а}$$

и

$$K = \frac{4{,}8}{0{,}016 - 0{,}075 \cdot 0{,}04} = 369.$$

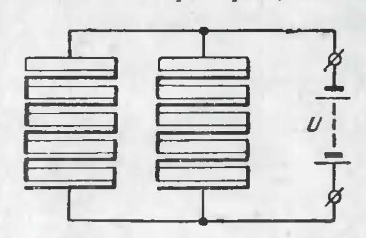
Таким образом, питание накалов указанных ламп при наивыгоднейшей схеме их включения можно обеспечить при помощи генератора, составленного из 240 термопар. Максимальная мощность, которую можно получить от такого генератора, определится по формуле (19):

$$P_0 = \frac{240 \cdot 0{,}016^2}{4 \cdot 0{,}04} = 0{,}384 \text{ вт},$$

т. е. при питании указанных ламп, потребляющих 0,36 *вт*, генератор будет работать почти с оптимальной нагрузкой.

7. РАБОТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ПРИ ЗАРЯДКЕ АККУМУЛЯТОРА

При использовании термоэлектрического генератора для зарядки аккумулятора схема его включения будет иметь вид, изображенный на фиг. 9. В этом случае заданным является только напряжение, развиваемое генератором, которое должно превышать напряжение на зажимах заряженного аккумулятора. Величину зарядного тока желательно получить возможно большей, и потому, если термоэлектрический генератор предназначается как для работы на постоянную активную нагрузку, так и для зарядки аккумулятора, возникает вопрос о наивыгоднейшей схеме соединения образующих его термопар в этом режиме работы. Очевидно, что зарядный ток, посылаемый генератором, состоящим из N параллельных групп по M термопар в каждой, в аккумулятор, напряжение на котором U и внутреннее сопротивление которого r_a будет:



Фиг. 9. Схема включения термоэлектрического генератора для зарядки аккумулятора.

$$I = \frac{Me_t - U}{\frac{Mr}{N} + r_a} \approx \frac{N(Me_t - U)}{Mr}, \qquad (20)$$

так как величиной r_a (не превосходящей сотых долей ома) по сравнению с величиной $\frac{Mr}{N}$ (имеющей порядок ома), можно пренебречь.

Наибольшее значение зарядного тока получится при

$$M_0 = \frac{2U}{e_t} \qquad (21)$$

и

$$N_0 = \frac{K}{M_0} = \frac{Ke_t}{2U}, \qquad (22)$$

где M_0 и N_0 — наивыгоднейшее число групп и термопар в группе.

Из формул (20) — (22) находим, что максимальный зарядный ток, который может быть получен от данного

термоэлектрического генератора за счет выбора наивыгоднейшей схемы его включения, будет:

$$I_0 = \frac{Ke_t^2}{4Ur}, \tag{23}$$

причем, мощность, отдаваемая в аккумулятор, составит:

$$P_0 = \frac{Ke_t^2}{4r}. \tag{24}$$

При значениях N_0, не равных целому числу, число параллельных групп следует брать равным ближайшему целому числу.

В процессе зарядки аккумулятора напряжение на его зажимах изменяется в некоторых пределах. При расчете термоэлектрического генератора в формулы следует проставлять значение U, которое держится на зажимах аккумулятора в течение наибольшего промежутка времени.

Пример 2. Определить схему включения 168 хромель-константановых термопар, развивающих каждая термо-э. д. с. 0,0356 *в* и имеющих сопротивление 0,01 *ом* при использовании их для зарядки аккумулятора, согласно зарядным кривым которого бо́льшую часть времени зарядки $U = 1{,}55$ *в*.

Подставляя приведенные выше данные в формулу (22), получаем:

$$N_0 = \frac{168 \cdot 0{,}0356}{2 \cdot 1{,}55} \approx 1{,}9.$$

Выбираем $N = 2$, $M = 84$. Зарядный ток при этом по формуле (20) будет:

$$I = \frac{2\,(84 \cdot 0{,}0356 - 1{,}55)}{84 \cdot 0{,}01} = 3{,}43 \ a,$$

в то время как при включении всех термопар последовательно он равнялся бы

$$I = \frac{168 \cdot 0{,}0356 - 1{,}55}{168 \cdot 0{,}01} = 2{,}59 \, a.$$

Таким образом, выбор правильной схемы включения позволяет повысить зарядный ток более чем на 30% по сравнению с током, получающимся при последовательном включении термопар.

8. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Повышать значения коэффициента η_t, т. е. увеличивать долю тепла, выделяющегося при горении, протекающую через термопары, можно не только увеличивая число термопар, но также путем соответствующего выбора геометрических размеров последних. В § 2 при выводе формул,

определяющих к. п. д. термопары η и максимальную мощность, отдаваемую генератором, температуры спаев $t_г$ и $t_х$ принимались заданными. В действительности температуры эти зависят от температур горящих газов, обогревающих горячие спаи термопар t_1, и от температуры воздуха или жидкости, обтекающей их холодные спаи t_2, а также материалов и геометрических размеров термопар, площади, подвергающейся нагреванию у горячих спаев, и площади крыльев охлаждения.

В термоэлектрических генераторах с к. п. д. порядка нескольких процентов поток тепла, обусловленный теплопроводностью термопар $P_х$, по меньшей мере в 6 раз превосходит количество тепла $P_т$, участвующего в процессе преобразования тепловой энергии в электрическую, и потому последним при ориентировочных подсчетах можно пренебречь.

Путь потока тепла $P_х$ можно представить себе в виде последовательного соединения трех тепловых сопротивлений: первого $\frac{1}{a_г s_г}$ — при переходе тепла от газов к горячему концу термопары, второго $\frac{1}{\varkappa}$ — при переходе тепла по самой термопаре и третьего $\frac{1}{a_x s_x}$ — при переходе тепла от холодного конца термопары в окружающую среду. Здесь $s_г$ и s_x — площади соприкосновения горячего и холодного спаев термопар с нагревающей и охлаждающей средами, выраженные в *мм*², $a_г$ и a_x — соответствующие коэффициенты теплопередачи, представляющие собой количество тепловой энергии в *вт*, протекающей через 1 *мм*² поверхности при разности температур этой поверхности и окружающей среды в 1° С, а $\varkappa$ — теплопроводность термопары, определяемая по формуле (2).

На эти тепловые сопротивления воздействует разность температур $t_1 - t_2$. Подобно электрическим напряжениям в цепи перепады температур на отдельных участках будут при этом распределяться пропорционально тепловым сопротивлениям этих участков и, следовательно,

$$t_г - t_x = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\varkappa} + \frac{1}{a_г s_г} + \frac{1}{a_x s_x}} \cdot \frac{1}{\varkappa} = \frac{t_1 - t_2}{1 + \beta \frac{s_2}{l}}, \tag{25}$$

где l — длина проводника термопары, принимаемая одинаковой для обоих проводников;

s_2 — сечение одного из них (выбранного произвольно) и

$$\beta = \left(\varkappa_1 \frac{s_1}{s_2} + \varkappa_2\right) \cdot \left(\frac{1}{a_г s_г} + \frac{1}{a_x s_x}\right). \qquad (26)$$

Коэффициент β введен только для более краткой записи формул.

Не выводя формулы для полного к. п. д. термоэлектрического генератора $\eta_{общ} = \eta_i \eta_t$, рассмотрим практически важную зависимость максимальной мощности, отдаваемой генератором, от соотношения геометрических размеров термопар, крыльев охлаждения и пластин у горячих спаев, с учетом того, что заданными являются температуры горячих газов t_1 и охлаждающего воздуха или воды t_2. Формула (19) дает величину наибольшей полезной мощности, которую можно получить от термоэлектрического генератора, составленного из термопар, развивающих термо-э. д. с. e_t и имеющих сопротивление r. Изменяя соотношение между длиной проводников термопар и их сечением, можно в известных пределах изменить e_t и r термопар, а следовательно, и мощность, которую может отдавать генератор. Эта мощность, как видно из формулы (19) будет тем больше, чем больше e_t и чем меньше r.

В свою очередь e_t тем больше, чем больше разность температур горячего и холодного спаев термопары $t_г - t_x$, как это видно из формулы (4). При заданных температурах t_1 и t_2 и площадях крыльев охлаждения s_x и пластин у горячих концов термопар $s_г$ разность $t_г - t_x$ (25), а следовательно, и величина e_t будут тем больше, чем больше отношение длины проводников термопары к их сечениям, причем по мере увеличения этого отношения e_t сначала растет быстро, а затем все медленнее и медленнее. Так как, с другой стороны, при увеличении отношения длины проводников термопары к их сечениям увеличивается сопротивление термопары, то, очевидно, должно существовать наивыгоднейшее соотношение между длиной и сечением проводников, при котором термоэлектрический генератор может отдавать наибольшую мощность.

Наивыгоднейшее соотношение длины проводников термопар к их сечениям, при котором величина P_0, определяемая формулой (19), будет иметь наибольшее значение, определяется условием

$$\frac{l}{s_2} = \beta. \qquad (27)$$

Подстановка (27) в (25) показывает, что при выполнении этого условия разность температур спаев термопары равна половине разности температур обтекающих их горячих и холодных газов.

Из формул (26) и (27) видно, что при увеличении площадей крыльев и пластин $s_г$ и s_x уменьшается величина наивыгоднейшего отношения длины к сечению. Так как при этом уменьшится сопротивление термопары, а разность температур на ее концах, а следовательно, и e_t останутся прежними, то от нее можно будет получить соответственно большую полезную мощность.

Во всех приведенных выше соображениях предполагалось, что температуры газов t_1 и t_2 заданы независимо от того, какова теплопроводность термопары. При достаточно больших площадях $s_г$ и s_x наивыгоднейшими окажутся согласно условию (27) размеры термопары, соответствующие настолько большой ее теплопроводности, что поток тепла через термопару будет заметно понижать температуру t_1 и повышать t_2. Такой выбор размеров термопар может привести уже не к увеличению, а к уменьшению отдаваемой ею полезной мощности.

Если как горячие, так и холодные спаи термопар находятся в одинаковой среде (газообразной или жидкой), то с достаточной для расчета точностью можно принимать $a_г = a_x = a$. При температуре воздуха около 20° С и температуре охлаждающих крыльев порядка 50° С этот коэффициент теплопередачи a составляет примерно $20 \div 40 \cdot 10^{-6}$ *вт мм*²°С. Коэффициенты теплопередачи a для текущей воды колеблются в пределах от $230 \cdot 10^{-6}$ до $2\,300 \cdot 10^{-6}$ *вт/мм*²°С.

Для увеличения площади нагрева горячие концы термопар можно утолщать, удлинять или прикреплять к ним пластины из металла с высокой теплопроводностью. Концы проводников термопары можно при этом не соединять между собой непосредственно, если металл пластины является также хорошим проводником. Как уже говорилось в § 1, третий металл, включенный в термопару так, что места его соединения с проводниками термопары находятся при оди-

наковой температуре, не будет влиять на термо-э. д. с. термопары.

На фиг. 10 показано соединение проводников термопары, применявшейся в одном из типов термоэлектрических генераторов. Здесь проводники, составляющие термопару, выполнены в виде трубок, соединенных между собой шайбой из третьего металла, внутри которых горит газ. Можно также использовать общую для ряда термопар пластину, но в этом случае между нею и термопарами должны быть помещены изоляционные прокладки для того, чтобы горячие спаи термопар не оказались замкнутыми между собой электрически.

Фиг. 10. Термопара, составленная из двух труб (нижней из сурьмы и верхней из нейзильбера), соединенных стальной шайбой, внутри которой горит газ.

Температура t_1 для различных типов горелок может колебаться в пределах примерно от 300 до 1 200° С.

Для повышения охлаждения к холодным спаям можно прикреплять значительно бо́льшие металлические пластины, чем к горячим, так как в этом случае не приходится считаться с необходимостью размещать все горячие спаи по возможности ближе к источнику тепла. Прикрепленные к холодным спаям пластины из металла с хорошей теплопроводностью (алюминий или медь), называемые крыльями, лопастями или ребрами, значительно усиливают охлаждение окружающим их воздухом путем конвекции. Водяное охлаждение весьма эффективно благодаря высокому коэффициенту теплопередачи, который при этом получается, однако устройство его связано с рядом трудностей.

Тепловой режим термоэлектрического генератора, предназначенного для преобразования энергии солнечных лучей в электрическую, имеет некоторые особенности.

Прежде всего в этом случае заданной является не температура t_1 горячего спая, а поток энергии P_c, падающий на металлическую пластину, соединенную с горячим спаем. Такие пластины обычно размещают в плоском застекленном ящике, называемом коллектором. Поток энергии разветвляется на два, первый из которых будет протекать по термопаре, а затем через охлаждающие крылья, а второй (включая тепловую энергию, уходящую за счет инфракрасного излучения с поверхности металлических пластин) че-

рез воздух в ящике коллектора и стенки последнего. Очевидно, что теплопроводность термопар выгодно уменьшать, так как при этом должны будут возрастать разность температур их горячего и холодного спаев $t_г - t_x$, а следовательно, и к. п. д. η. Однако по мере уменьшения теплопроводности термопар все меньшая доля тепловой энергии солнечных лучей, падающих на пластины, будет проходить через термопары, а не через стенки коллектора. Этой долей $\eta_к$, выраженной в процентах от количества солнечной энергии, падающей на коллектор, определяется эффективность коллектора.

Общий к. п. д. генератора $\eta_{общ}$ равен произведению эффективности коллектора $\eta_к$ на к. п. д. термопар η. Таким образом, при чрезмерном уменьшении теплопроводности термопар к. п. д. генератора начнет понижаться, так как хотя к. п. д. преобразования тепловой энергии в электрическую в термопарах будет несколько возрастать, но зато поток тепловой энергии через них резко сократится за счет увеличения потока тепла через стенки коллектора.

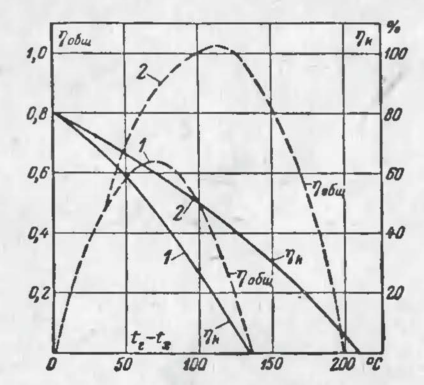
Важное значение имеет правильный выбор способа застекления коллектора. Стекло пропускает видимые лучи лучше, чем инфракрасные лучи, которые излучает нагретая металлическая пластина, отдавая, таким образом, значительную часть падающей на нее энергии солнечных лучей. Чем больше слоев стекла, тем меньше из коллектора уйдет энергии с инфракрасными лучами, но тем меньше попадет в него и солнечных лучей, так как последние частично отражаются от каждого слоя стекла, частично поглощаются ими.

Экспериментально установлено, что наилучшие результаты получаются при использовании двух слоев обычного стекла с воздушным промежутком между ними в 1,2—1,5 *см* или четырех слоев специального стекла, слабее отражающего видимые солнечные лучи, расположенных с такими же промежутками. Эффективность коллектора $\eta_к$ во втором случае выше (сплошная кривая *2*), как это видно из кривых на фиг. 11, где показана зависимость эффективности коллектора от разности температуры внутри коллектора, т. е. практически от $t_г$ и температуры окружающего воздуха t_2, отличающейся от t_x на 10—20° С.

На той же фигуре приведены кривые изменения общего к. п. д. $\eta_{общ}$ генератора, преобразующего сол-

нечную энергию в электрическую в зависимости от той же разности температур $t_г - t_2$. Из этих кривых видно, как общий к. п. д. $\eta_{общ}$ сначала растет с увеличением разности $t_г - t_2$, а затем начинает падать, несмотря на увеличение разности температур, а следовательно к. п. д. термопар.

Пример 3. Найти температуры $t_г$ и t_x горячего и холодного спаев железо-константановой термопары длиной $l = 5$ *см*, с сечением железного проводника $s_1 = 2$ *мм*² и константанового $s_2 = 2,5$ *мм*², снабженной охлаждающим крылом площадью $s_x = 600$ *мм*² и пластиной у горячего спая площадью $s_г = 540$ *мм*², если температура горячих газов $t_1 = 530°$ С, а температура воздуха у холодного конца $t_2 = 20°$ С.



Фиг. 11. Кривые зависимости эффективности коллектора $\eta_к$ и к. п. д. термоэлектрического генератора $\eta_{общ}$, использующего солнечную энергию, в зависимости от $t_г - t_2$.

1 — коллектор застеклен двумя слоями обычного стекла; *2* — коллектор застеклен четырьмя слоями специального стекла.

Сравнить с температурами $t_г$ и t_x, получающимися при тех же условиях и размерах для медно-константановой термопары.

Так как температуры $t_г$ и t_x спаев термопары неизвестны, то среднюю температуру термопары определяем по формуле (3), подставляя в нее вместо $t_г$ и t_x, t_1 и t_2:

$$t = \frac{530 + 20}{2} = 275° \text{ C}.$$

Находим по табл. 2 для 275° С теплопроводности железа $\varkappa_1 = 31 \cdot 10^{-6}$ и константана $\varkappa_2 = 33 \cdot 10^{-6}$. Тепловое сопротивление термопары (обратное ее теплопроводности) будет:

$$\frac{1}{\varkappa} = \frac{l}{s_1 \varkappa_1 + s_2 \varkappa_2} = \frac{0,05 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 31 + 2,5 \cdot 33} = 346.$$

Принимая коэффициент теплопередачи a, лежащий в пределах $20 \div 40 \cdot 10^{-6}$, равным $25 \cdot 10^{-6}$, находим тепловые сопротивления на границах между горячими газами и пластиной у горячего спая $\frac{1}{a \cdot s_г} = \frac{10^6}{25 \cdot 540} = 80$ и между воздухом и крыльями охлаждения $\frac{1}{a \cdot s_x} = \frac{10^6}{25 \cdot 600} = 67.$

Пользуясь полученными значениями для определения перепада температур между воздухом и крыльями охлаждения, находим температуру последних:

$$t_x = \frac{(530 - 20) \cdot 67}{80 + 346 + 67} + 20 \approx 87° \text{ C}.$$

Подставляя их в формулу (25), определяющую разность температур горячего и холодного спаев, и добавляя температуру холодного спая t_x, находим температуру горячего спая:

$$t_г = \frac{(530 - 20)\, 346}{80 + 346 + 67} + 87 = 447° \text{ C}.$$

Для проверки определим среднюю температуру проводников термопары, подставляя в формулу (3) найденные значения $t_г$ и t_x:

$$t = \frac{447 + 87}{2} = 267° \text{ C},$$

что весьма близко к найденному ранее ориентировочно значению 275° С.

В случае медно-константановой термопары, беря теплопроводность меди при 275° С по табл. 2 $\varkappa_1 = 375 \cdot 10^{-6}$, находим тепловое сопротивление термопары:

$$\frac{1}{\varkappa} = \frac{0,05 \cdot 10^6}{2 \cdot 375 + 2,5 \cdot 33} = 60,$$

откуда при прежних значениях $\frac{1}{as_г}$ и $\frac{1}{as_x}$ находим

$$t_x = \frac{(530 - 20)\, 67}{80 + 60 + 67} + 20 = 186° \text{ C}$$

и

$$t_г = \frac{(530 - 20)\, 60}{80 + 60 + 67} + 186 = 330° \text{ C}.$$

Полученные результаты расчета показывают, что из-за большой теплопроводности меди ее сечение следует брать весьма малым во избежание резкого снижения перепада температур на концах термопары.

9. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Практически при конструировании термоэлектрического генератора горячие спаи термопар обычно располагаются в ограниченном пространстве вблизи пламени горелки нагревателя. Все тепло, уносимое горячими газами из этого пространства, теряется бесполезно.

Поэтому геометрические размеры термопар следует выбирать так, чтобы обеспечить возможно бо́льшую отдачу полезной мощности P_0 каждой из термопар, даже

за счет снижения их к. п. д. η. Для этого должно удовлетворяться условие (27). Соотношение между s_1 и s_2 при этом следует выбирать наивыгоднейшим с точки зрения повышения η по формуле (10).

Ради удобства крепления термопар в блоке и обеспечения достаточной толщины теплоизоляционных прокладок, отделяющих нагреватель от окружающего воздуха, длину термопар l нельзя выбирать слишком малой. Выбор сечений проводников термопары s_1 и s_2 определяется необходимостью обеспечить достаточную механическую прочность термопары.

Площади $s_г$ и s_x определяются при помощи формул (27) и (26), причем обычно s_x удобно выбирать больше, чем $s_г$, так как крылья охлаждения располагаются значительно свободнее, чем пластины горячих спаев.

Общий вес конструкции определяется по формуле

$$W = K(s_1 l \gamma_1 + s_2 l \gamma_2 + 0{,}5\, s_г d_г \gamma_г + 0{,}5\, s_x d_x \gamma_x), \qquad (28)$$

где γ_1 и γ_2 — удельный вес материалов проводников, образующих термопары;

$\gamma_г$ и γ_x — удельный вес материалов пластины у горячих спаев термопары и крыльев охлаждения;

$d_г$ и d_x — толщина пластины у горячих спаев и толщина крыльев.

Следует иметь в виду, что термо-э. д. с., ρ и $\varkappa$ используемых материалов могут довольно значительно отклоняться от значений, взятых из таблиц и справочников (на 10 — 20%), причем для сплавов эти отклонения могут быть еще выше. Однако нет необходимости очень точно придерживаться наивыгоднейшего соотношения сечений s_1 и s_2, так как отклонение на 10 — 20% от расчетного вызовет еще очень слабое понижение к. п. д. Если начинать с выбора размеров, определяющих βs_2, то ошибка при вычислении наивыгоднейшей длины термопар $l = \beta s_2$, могущая возникнуть из-за недостаточной определенности величины a и, следовательно, β, слабо сказывается на величине отдаваемой полезной мощности, по крайней мере пока эта ошибка не выходит за пределы -50%, $+100\%$.

Пример 4. Рассчитать термоэлектрический генератор на железо-константановых термопарах для питания приемника, потребляющего по цепям накала 0,52 *а* при 1 *в* и по анодным цепям 11 *ма* при 90 *в*. В качестве источника тепла использовать керосиновую лампу, потребляющую $q = 70$ *г* керосина в час, с теплотворной способностью $Q = 11\,500$ *втч/кг*, принимая, что она дает температуру вблизи пламени 300 — 400° С.

Ориентировочно принимаем $t_г - t_x = 200°$ С и среднее значение термо-э. д. с. для железо-константановой термопары $55 \cdot 10^{-6}$ *вт*/° С.

Для ориентировочного определения средней температуры материалов термопары примем температуру ее холодного спая $t_x = 40°$ С. Тогда, так как выше было принято $t_г - t_x$ равным 200° С, средняя температура по формуле (3) будет

$$t = 40 + \frac{200}{2} = 140° \text{ C}.$$

Беря из табл. 2 ρ_1, ρ_2 $\varkappa_2$ и $\varkappa_2$, соответствующие приблизительно 140° С, и учитывая, что температура горячих спаев в градусах абсолютной шкалы равна $273 + 40 + 200 \approx 500°$ С, находим по формуле (11):

$$\eta_{макс} = \frac{200}{500} \cdot \frac{1}{2 + \frac{4(\sqrt{0{,}22 \cdot 42} + \sqrt{0{,}49 \cdot 29})^2}{55^2 \cdot 10^{-6} \cdot 500}} = 0{,}33\%.$$

Обычно η_t лежит между 10—30%; таким образом, от генератора можно получить

$$Q \cdot q \cdot \eta_{макс}\, \eta_t = 11\,500 \cdot 0{,}07 \cdot 0{,}0033\,(0{,}1 \div 0{,}3) = 0{,}28 \div 0{,}84 \text{ вт}.$$

Следовательно, накал можно питать непосредственно от генератора, анодные же цепи можно питать лишь от аккумуляторов, предварительно заряжаемых от термоэлектрического генератора.

Принимая, что для зарядки аккумулятора генератор должен развивать напряжение 2,2 *в*, и определяя по формуле (4) термо-э. д. с. одной термопары $e_t = 55 \cdot 10^{-6} \cdot 200 = 0{,}011$ *в*, находим, что он должен состоять из $\frac{22}{0{,}11} = 200$ термопар. С другой стороны, генератор должен питать цепи накала и потому согласно формуле (16) должно быть:

$$200 = \frac{1}{0{,}011 - 0{,}52\, r},$$

откуда следует, что сопротивление каждой из термопар должно быть:

$$r = \frac{0{,}011 - 0{,}005}{0{,}52} = 0{,}012 \text{ ом}.$$

Наивыгоднейшее соотношение сечений проводников термопары согласно формуле (10) будет:

$$s_\eta = \sqrt{\frac{0{,}22 \cdot 29}{0{,}49 \cdot 42}} = 0{,}55.$$

Пользуясь формулой (1), находим, что

$$\frac{l}{s_2} = \frac{r}{\frac{\rho_1}{s_\eta} + \rho_2} = \frac{0{,}012}{\frac{0{,}22}{0{,}55} + 0{,}49} = 0{,}013.$$

3*

Если принять температуру воздуха t_2 порядка 10—15° С и температуру горячих газов t_1 около 400° С, то при соблюдении условия (27) и выборе соотношения между площадью пластин и крыльев $s_x = 6s_z$, получим на концах термопар примерно те температуры $t_z = 240°$ С и $t_x = 40°$ С, которые были приняты ориентировочно в начале расчета.

Приняв $a = 25 \cdot 10^{-6}$ из условия (27), переписанного в виде:

$$\frac{l}{s_2} = \beta = (\varkappa_1 s_\eta + \varkappa_2) \cdot \left(\frac{1}{S_z} + \frac{1}{6S_z}\right) \cdot \frac{1}{a} =$$

$$= (42 \cdot 0{,}55 + 29)\, 10^{-6} \cdot 1{,}17 \, \frac{1}{s_z \, 25 \cdot 10^{-6}} = \frac{2{,}43}{s_z},$$

получаем:

$$s_z = \frac{2{,}43}{0{,}013} = 187 \text{ мм}^2,$$

откуда

$$s_x = 6s_z = 6 \cdot 187 = 1\,122 \text{ мм}^2.$$

Принимая длину термопар равной 4 *см*, находим:

$$s_2 = \frac{0{,}04}{0{,}013} = 3{,}1 \text{ мм}^2;$$

$$s_1 = s_\eta s_2 = 0{,}55 \cdot 3{,}1 = 1{,}7 \text{ мм}^2.$$

Принимая, что пластины у горячих спаев и крылья сделаны из меди толщиной в 1 *мм*, находим по формуле (28) общий вес конструкции:

$$W = 200\,(1{,}7 \cdot 0{,}04 \cdot 7{,}8 + 3{,}1 \cdot 0{,}04 \cdot 8{,}9 + 0{,}5 \cdot 187 \cdot 0{,}001 \cdot 8{,}9 +$$

$$+ 0{,}5 \cdot 1\,122 \cdot 0{,}001 \cdot 8{,}9) = 1\,490 \text{ г} \approx 1{,}5 \text{ кг}.$$

При зарядке от такого термоэлекрического генератора щелочных аккумуляторов на 1,4 *в*, имеющих в процессе зарядки напряжение 1,5 *в*, зарядный ток

$$I = \frac{2{,}2 - 1{,}5}{200 \cdot 0{,}012} = 0{,}29 \text{ а}$$

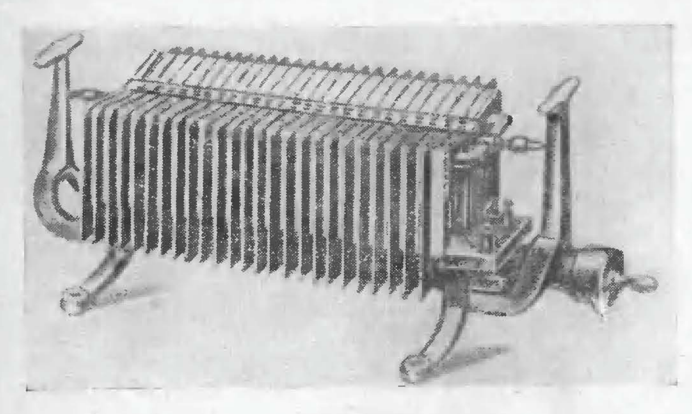
и отдаваемая при этом мощность

$$P = 0{,}29 \cdot 1{,}5 = 0{,}44 \text{ вт}.$$

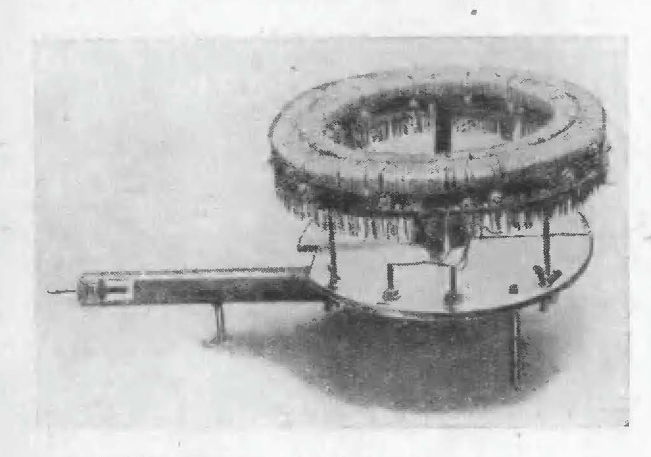
При питании анодных цепей через вибропреобразователь с к. п. д. 0,55 для обеспечения 1 часа работы приемника будет требоваться $\frac{0{,}011 \cdot 90}{0{,}44 \cdot 0{,}55} = 4$ час. работы генератора на аккумулятор.

10. ЛАБОРАТОРНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Из термоэлектрических генераторов начала XX в. наибольшую известность приобрела так называемая батарея Гюльхера (фиг. 12). Составляющие ее 66 термопар укреплены в два ряда на шиферной пластине и электрически соединены между собой последовательно; каждая из них представляет собой никелевую трубочку, являющуюся одновременно одним из проводников термопары и газовой горелкой,



Фиг. 12. Батарея Гюльхера.



Фиг. 13. Термоэлектрический генератор для зарядки аккумуляторов.

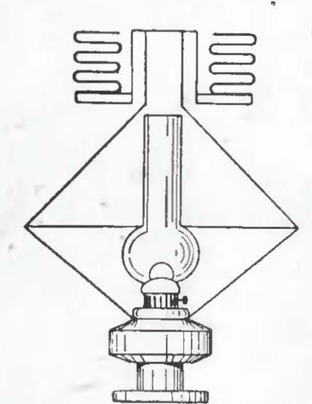
нагревающей горячий спай термопары. У верхнего конца трубочки, где горит газ, к ней прикреплен второй проводник термопары из сплава цинка с сурьмой. Между собой термопары соединены широкими медными пластинками, которые одновременно служат крыльями охлаждения. Генератор раз-

вивает э. д. с. около 4 *в*, его внутреннее сопротивление составляет 0,65 *ом*. Расход газа при нормальной работе 170—200 *л* в час, причем общий к. п. д. получается порядка 0,5—0,6%. Длина батареи 540 *мм*, ширина 165 *мм* и высота 160 *мм*, вес ≈ 14 *кг*.

На фиг. 13 показан внешний вид другого термоэлектрического генератора для зарядки аккумуляторных батарей. В нем применены железо-константановые термопары, горячие спаи которых имеют специальные покрытия для защиты от воздействия высокой температуры. Эти спаи введены в газовую горелку и расположены в виде двух колец. Генератор развивает э. д. с. 3,5 *в*. Внутреннее сопротивление генератора равно 2 *ом*. При расходе газа около 650 *л* в час генератор имеет к. п. д. около 0,04%.

11. РАДИОЛЮБИТЕЛЬСКИЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

В № 13 журнала «Радиофронт» за 1937 г. было помещено описание конструкции радиолюбительского термоэлектрического генератора, рассчитанного на использование тепла, отдаваемого осветительной керосиновой лампой и предназначенного для питания цепи накала радиоприемника.



Фиг. 14. Схематическое изображение радиолюбительского термоэлектрического генератора.

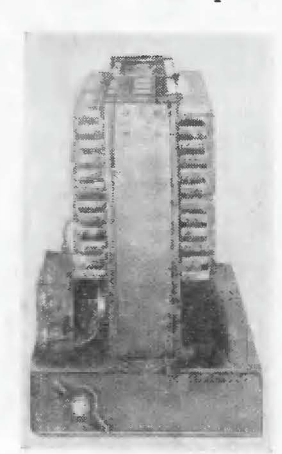
На фиг. 14 приведено схематическое изображение этого генератора, сконструированного в виде дополнительного абажура, надеваемого на лампу. Генератор состоит из ряда кругов изоляционного материала, в качестве которого рекомендуется брать плотный асбестовый картон. В этих кругах делаются вырезы для воздушного охлаждения. Места соединения материалов, образующих термопары (железо — константан или медь — константан), тщательно свариваются или спаиваются медью или серебром.

Поверхность горячих спаев для лучшего лучепоглощения рекомендуется покрывать копотью. Для обеспечения возможно лучшего охлаждения холодных концов термопар абажур к лампе делается также из асбестового картона и располагается под термогенератором, чтобы предохранить холодные спаи от обтекания их теплым воздухом. Сами холодные спаи должны быть не короче 2—3 *см*. Разность температур между горячими и холодными спаями будет конечно зависеть от типа используемой керосиновой лампы и условий охлаждения холодных спаев. Ориентировочно ее можно считать порядка 200° С.

Разность температур горячего и холодного спаев и эффективность генератора можно повысить, снабдив как горячие, так и холодные концы термопар пластинами и крыльями соответствующей площади.

12. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

На фиг. 15 приведен внешний вид термоэлектрического генератора на 5 *вт* выходной мощности, использовавшегося для питания радиоаппаратуры в войсках США во второй мировой войне. Он состоит из 168 хромель-константановых термопар, заключенных в теплоизолирующую керамику. Для нагрева горячих спаев в нем применяется бесшумная бензиновая горелка, работающая на высокооктановом бензине. В этой горелке предусмотрено специальное устройство, регулирующее давление воздуха, имеются смесительная камера и игольчатый кран для подачи распыленного бензина, а также общий кран, запирающий подачу горючего. Температура воздуха у горячих спаев поддерживается около 725° С, причем холодные спаи оказываются нагретыми до 93° С, так как охлаждаются только наружным воздухом. Перепад температур между горячими и холодными спаями оказывается порядка 400° С. Генератор может эксплуатироваться в двух режимах.



Фиг. 15. Термоэлектрический генератор для питания портативной радиоаппаратуры.

1. Для питания портативного радиооборудования через вибропреобразователь, для чего все термопары соединяются последовательно. Внутреннее сопротивление термоэлектрического генератора в этом случае составляет около 1,75 *ом*. Генератор отдает ток в 2 *а*, причем напряжение на его выходе равняется 2,5 *в*.
2. Для заряда двухвольтных портативных кислотных ак-

кумуляторов, для чего термопары включаются двумя параллельными группами по 84 термопары каждая.

Замена термопар может потребоваться по истечении примерно 2 000 час. работы установки. Генератор может непрерывно работать около 8 час., расходуя 3,8 *л* бензина. Коэффициент полезного действия генератора 0,2%. Вес установки около 5 *кг*.

Наиболее современным типом термоэлектрического генератора, предназначенного для питания радиоприемников, является выпускаемый нашей промышленностью генератор ТГК-3 (термоэлектрический генератор керосиновый, трехваттный). Он рассчитан на питание батарейных приемников «Родина-47», «Родина-52», «Искра», Б-2, «Тула». Параметры цепей питания этих приемников приведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры цепей питания некоторых батарейных приемников

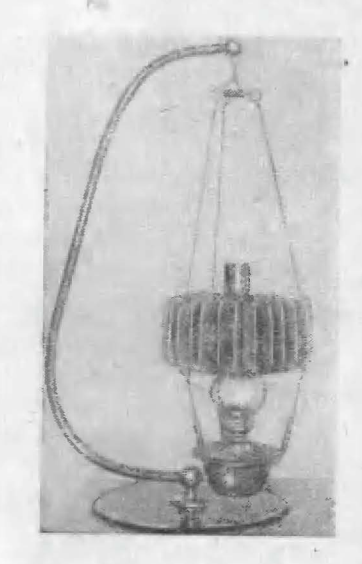
Приемник	Накал		Анод		Напряжение смещения, *в*
	Напряжение, *в*	Ток, *а*	Напряжение, *в*	Ток, *ма*	
„Родина-47" . . .	2±10%	0,50	120±10%	8	—
„Родина-52" . . .	1—1,4	0,52	90±10%	11	9+10%
„Искра"	1—1,4	0,30	90±10%	11	9+10%
Б-2	1—1,4	0,30	90±10%	11	—

Термоэлектрический генератор ТГК-3 состоит из нагревателя, служащего одновременно и осветительным прибором, блока термопар и вибропреобразователя, преобразующего низкое напряжение, развиваемое термоэлектрическим генератором, в напряжение, достаточно высокое для питания анодных и сеточных цепей радиоприемника.

Внешний вид ТГК-3 изображен на фиг. 16. Нагревателем служит 20-линейная керосиновая лампа с укороченным стеклом. Внутрь этого стекла, непосредственно над пламенем лампы, входит нижняя часть теплопередатчика, имеющего форму многогранной призмы, на боковой поверхности которой, там, где она уже выступает над стеклом, расположены блоки термопар. В теплопередатчике имеется несколько продольных каналов, по которым горячие газы протекают от пламени к вытяжной трубе, расположенной над нагревателем. Таким образом, термопары нагреваются не только за счет лучеиспускания пламени лампы, но и путем

конвекции. К внешним поверхностям блоков термопар прижато 14 металлических крыльев.

Термопары соединены в две батареи. Одна из них, предназначенная для питания цепей накала, дает напряжение 2 *в* при токе 0,5 *а* и имеет дополнительный отвод, позволяющий снимать с нее напряжение 1,2 *в* при токе 0,36 *а*. Другая предназначена для питания анодных цепей через вибропреобразователь и дает напряжение 2 *в* при токе 2 *а*. Вибропреобразователь заключен в отдельный кожух, в верхней части которого смонтированы измерительный контрольный прибор для контроля накала ламп радиоприемников и сигнальная лампочка для проверки готовности термоэлектрического генератора к работе. Высота термоэлектрического генератора вместе с устройством для подвешивания 1 000 *мм*, диаметр 300 *мм*, вес 8 *кг*. Емкость лампы 0,75 *л*. Расход керосина в час 60—70 *г*. Общий к. п. д. генератора, принимая теплотворную способность керосина 11 000—12 000 *вт · час/кг*, равен 0,6 ÷ 0,75%.



Фиг. 16. Термоэлектрический генератор ТГК-3.

Дальнейшим усовершенствованием термоэлектрического генератора ТГК-3 является новый термоэлектрогенератор ТЭГК-2-2, предназначенный для питания батарейных приемников «Родина-47», «Родина-52» и «Искра».

В отличие от термоэлектрогенератора ТГК-3 новый термоэлектрический генератор не нуждается в вибропреобразователе. Он состоит из двух термобатарей, из которых одна служит для питания цепей накала, а другая (высоковольтная) — для непосредственного питания анодных и сеточных цепей приемника.

Нагрузочные характеристики ТЭГК-2-2 приведены в табл. 7.

Так же как и в термоэлектрогенераторе ТГК-3, термоголовка нового генератора надевается на 20-линейную керосиновую лампу «Молния», которая излучаемым ею теплом

Таблица 7

Нагрузочные характеристики термоэлектрического генератора ТЭГК-2-2

Термобатарея накала		Термобатарея анода	
Напряжение, *в*	Ток, *ма*	Напряжение, *в*	Ток, *ма*
1,4	180	150	5
1,2	300	120	7,5
1,0	420	100	9
0,8	540	80	11,5
0,6	650	60	13,5

нагревает спаи термобатареи и одновременно может служить для освещения помещения.

Испытания показали, что вследствие отсутствия вибропреобразователя уровень шумов приемника, питающегося от термоэлектрогенератора ТЭГК-2-2, значительно ниже, чем при питании этого же приемника от термоэлектрического генератора ТГК-3.

В 1955 г. за рубежом были разработаны два типа термоэлектрических генераторов с подогревом от газовой горелки. Каждый генератор снабжается небольшим сменным баллоном весом 4 *кг* со сжатым газом (бутан), количество которого достаточно для непрерывной работы генератора на полную мощность в течение 100 час. Термогенераторы предназначены для питания цепей накала и анода (через вибропреобразователь) радиовещательных приемников в неэлектрифицированных районах, а также для питания другой переносной радиоаппаратуры в экспедиционных условиях.

Особенностью термобатарей этих генераторов является применение жаропрочных сплавов, из которых собраны термопары. Состав этих сплавов не опубликован.

В каждой термопаре в качестве положительного электрода используется сплав ВТЕ (шифр), температура плавления которого около 1 400° С.

Отрицательный электрод термопары выполняется в трех вариантах. В первом варианте он изготовлен из чистого никеля (шифр NTE). Во втором варианте он составлен из сплава СТЕ с температурой плавления 1 300° С. Этот сплав при температуре красного каления (900—1 000° С) начинает окисляться и поэтому рабочая температура термоэлемента не должна превышать 700—750° С. В третьем варианте отрицательный электрод выполнен из сплава АТЕ, который по своим механическим и физическим свойствам близок к спла-

ву ВТЕ. Термопара ВТЕ-АТЕ может работать не окисляясь и не теряя своей механической прочности при наиболее высоких температурах.

Термо-э. д. с. термопар, составленных из этих сплавов, колеблется от 40 до 70 *мкв* на градус. Значения термо-э. д. с. этих термопар для различных температур приведены в табл. 8.

Таблица 8

Термо-э. д. с. термоэлементов при различных температурах

Термопара	Температура, °С					
	100	300	500	700	900	1 000
	э. д. с., *мв*					
ВТЕ-NTE	4,15	12,65	21,05	29,52	38,10	—
ВТЕ-СТЕ	6,05	20,46	35,65	51,97	—	—
ВТЕ-АТЕ	4,10	12,21	20,64	29,14	33,31	41,31

Конструктивно один из генераторов выполнен в виде металлической прямоугольной рамки размерами 135 × 250 *мм* из уголкового материала. Посредине рамки укреплена газовая трубка диаметром 10 *мм* с 36 отверстиями диаметром по 1,5 *мм* каждое. Трубка на одном конце снабжена патрубком для присоединения шланга от баллона с газом и краном для регулирования притока газа. Максимальная температура нагрева получается при высоте пламени в 1 *см*. При изменении высоты пламени меняется степень нагрева и э. д. с. батареи.

На основную рамку монтируется вторая, в которой на асбестовых прокладках закреплены термопары первой батареи. Термопары собраны в четыре конструктивных группы и расположены так, что обогреваемые спаи находятся внутри рамки вдоль длинной осевой линии, а охлаждаемые концы— по обе стороны рамки. Когда рамка с батареей крепится на основную рамку, то газовая трубка приходится как раз против спаев, подлежащих нагреву. Вторая батарея генератора на такой же рамке, как и первая, монтируется над первой батареей так, что расстояние между спаями обеих батарей составляет около 3 *мм*.

Как уже упоминалось, выпущены два типа таких термоэлектрогенераторов. Первый тип генератора состоит из двух батарей по 60 термопар в каждой. Каждая термопара изготовлена из полосок длиной 55, шириной 1,7 и толщиной 0,5 *мм*. Полоски разноименных сплавов, составляющих тер-

мопару, сварены внакладку на протяжении 12 *мм*. Вес одной пары равен 1 *г*. Все 60 термопар соединены между собой последовательно.

Нагрев батареи производится либо газовой горелкой описанного выше типа, либо специальной спиртовой горелкой. При рабочей температуре в 400° С каждый термоэлемент дает 0,03 *в*, а при температуре 200° С — около 0,02 *в*. После двух минут прогрева вся батарея дает 2 *в*. При токе в 220 *ма* напряжение батареи падает до 1,7 *в*.

Вторая батарея расположена над первой. Ее спаи обогреваются слабее, чем у первой, а поэтому и мощность, отдаваемая ею, тоже меньше (вдвое).

Второй тип термогенератора конструктивно мало отличается от первого; он тоже состоит из двух батарей. Максимальная э. д. с. первой батареи этого генератора равна 4,8 *в*. При токе в 220 *ма* напряжение на ее зажимах падает до 2,7 *в*. Максимальная мощность батареи 0,6 *вт*.

Вес обеих батарей (без подставки) 150 *г*.

Если сильно уменьшить подачу газа (при помощи регулирующего крана), то мощность батареи падает до 0,4 *вт*. При этом одного баллона газа (весом в 4 *кг*) хватает на 150 час. работы генератора.

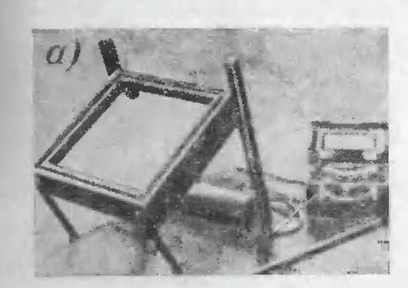
13. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

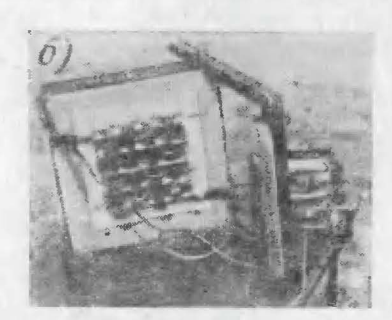
В США были проведены испытания опытного образца термоэлектрического генератора для прямого использования солнечной энергии. Общий вид установки изображен на фиг. 17.

На фиг. 17,*а* показан вид спереди плоского коллектора, укрепленного на ножках так, что его можно поворачивать, устанавливая перпендикулярно к солнечным лучам, а на фиг. 17,*б* — вид того же коллектора сзади, где расположены крылья охлаждения из листовой меди, одновременно служащие для последовательного соединения всех 25 термопар, составляющих генератор.

Были испытаны термопары трех различных типов. Для поглощения солнечных лучей к их горячим спаям прикреплялись зачерненные медные пластины толщиной 0,5 *мм*. Коллектор был застеклен двумя слоями обыкновенного стекла. Для теплоизоляции в коллекторе применялся материал, теплопроводность которого $0{,}05 \cdot 10^{-6}$ *вт · м/мм²* °С. Основные размеры установки и результаты, полученные при ее испытании, приведены в табл. 9.

Как видно из кривых фиг. 11, применением для застекления коллектора четырех слоев специального сорта стекла, слабо отражающего солнечные лучи, к. п. д. генератора с термопарами цинк — сурьма и висмут—сурьма можно довести до 1,05%. Были также произведены измерения с одной





Фиг. 17. Термоэлектрический генератор для использования солнечной энергии.
а — вид спереди; *б* — вид сзади.

термопарой (цинк — сурьма) — константан, на горячий спай которой был направлен пучок сконцентрированных солнечных лучей, площадью 116 *мм²*, собранных с площади, в 50 раз большей. Разность температур горячего и холодного концов термопары равнялась 247° С. Термопара развивала термо-э. д. с. $56 \cdot 10^{-3}$ *в* и от нее можно было получить до 0,156 *вт* полезной мощности. Коэффициент полезного действия достигал 3,35%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До настоящего времени термоэлектрические генераторы использовались в качестве источника электрической энергии в лабораториях или для питания маломощной радиоаппаратуры. Новейшие достижения в области разработки специальных, более эффективных материалов для термопар уже значительно расширили возможности применения термоэлектрических генераторов и позволяют ожидать в дальнейшем, что последние найдут еще ряд новых применений.

Уже на основе существующих материалов разрабатываются типы термоэлектрических генераторов для использования солнечной энергии в слабо электрифицированных районах, расположенных вблизи от тропиков и отличающих-

Таблица 9

Данные термогенераторов для прямого использования солнечной энергии

Термопары	Длина проводников термопары l, см	Сечения проводников термопары, $см^2$: s_1	Сечения проводников термопары, $см^2$: s_2	Общая площадь для 25 термопар, $см^2$: Пластин S_2	Общая площадь для 25 термопар, $см^2$: Крыльев S_x	Общее количество солнечной энергии, падающей на 25 пластин, *вт*	$t_2 - t_x$, °C	Общее сопротивление 25 термопар, *ом*	Сопротивление нагрузки, *ом*	Полезная мощность, *вт*	Коэффициент полезного действия, %
(Сурьма+цинк)—(91% висмут+9% сурьма) . . .	2,5	1,26	0,32	360	500	31	54,5	0,126	0,137	0,165	0,59
(Сурьма+цинк)—(94% висмут+6% сурьма) . . .	3,8	1,60	0,38	360	500	29,5	54	0,195	0,215	0,175	0,59
Хромель—константан . . .	2,7	0,103	0,103	360	500	31	54,5	0,083	0,088	0,021	0,068

ся большим числом солнечных дней в году, а также термоэлектрические генераторы с подогревом атомной энергией.

Дальнейшее повышение к. п. д. термопар за счет разработки еще более эффективных материалов должно привести к широкому внедрению термоэлектрических генераторов в качестве источников электрической энергии небольшой мощности (до 1 *квт*), как только их общий к. п. д. будет доведен до 5—7%.

Ценность термоэлектрических генераторов в качестве источников питания радиоаппаратуры, в особенности в неэлектрифицированных районах значительно возрастет в связи с внедрением полупроводниковых триодов, потребляющих значительно меньше энергии, чем заменяемые ими в ряде случаев электронные лампы.